水源涵养林不同植被类型土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 分布特征*

高洪翠[1,3] 范志平[1,2**] 李法云[2] 李海燕[4] 徐英华[4]

([1]中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; [2]辽宁石油化工大学生态环境研究院, 辽宁抚顺 113001; [3]中国科学院大学, 北京 100049; [4]辽宁老秃顶子国家级自然保护区抚顺管理局, 辽宁抚顺 113208)

摘 要 以辽宁东部山地水源涵养林为对象,选择槭树-蒙古栎林、山杨林、白桦-山杨林和落叶松人工林等4种植被类型,测定其土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N、pH 值、容重、有机碳和全氮等理化指标,分析了植被类型、土壤层次与土壤无机氮分布特征之间的关系。结果表明:4种植被类型土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 在土壤表层(0~5 cm)含量最高,由表层向下逐渐降低;土壤总无机氮含量大小为落叶松人工林(27.46 mg·kg^{-1})>山杨林(21.76 mg·kg^{-1})>槭树-蒙古栎林(19.09 mg·kg^{-1})>白桦-山杨林(17.88 mg·kg^{-1});阔叶林中 NH_4^+-N 是土壤无机氮的主要存在形式,而落叶松人工林土壤中 NO_3^--N 所占比例较高;水源涵养林土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 均与土壤有机质、土壤含水量呈极显著正相关($P<0.01$)。总体而言,植被类型对土壤无机氮分布有较大影响,研究结果可为辽东山区水源涵养林植被类型的选择和结构调控提供参考。

关键词 植被类型; 土壤层次; 铵态氮; 硝态氮

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)5-1211-06

Soil NH_4^+-N and NO_3^--N distribution of different vegetation types in water conservation forests.

GAO Hong-cui[1,3], FAN Zhi-Ping[1,2**], LI Fa-yun[2], LI Hai-yan[4], XU Ying-hua[4] ([1]*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*; [2]*Institute of Eco-environment Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun* 113001, *Liaoning, China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; [4]*Fushun Authority of Liaoning Laotudingzi National Nature Reserve, Fushun* 113208, *Liaoning, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1211-1216.

Abstract: In this paper, we analyzed soil inorganic nitrogen (NH_4^+-N, NO_3^--N), pH, bulk density, organic carbon and total nitrogen in four water-conservation forests (*e. g. Acer mono-Quercus mongolica* forest, *Populus davidiana* forest, *Betula platyphylla-P. davidiana* forest, and *Larix kaempferi* plantation) in the mountain area of eastern Liaoning, to reveal the relationships of vegetation type with soil layer and soil inorganic nitrogen distribution. Results indicated that the concentrations of soil NH_4^+-N and NO_3^--N were highest in the Oa horizon (0-5 cm) and decreased gradually in the mineral soil layers. Soil inorganic nitrogen concentration was in a sequence of *L. kaempferi* plantation (27.46 mg·kg^{-1}) > *P davidiana* forest (21.76 mg·kg^{-1}) > *A. mono-Q. mongolica* forest (19.09 mg·kg^{-1}) > *B. platyphylla-P. davidiana* forest (17.88 mg·kg^{-1}). NH_4^+-N was the major form of soil inorganic nitrogen in the broad-leaved forests, while NO_3^--N was dominant in *L. kaempferi* plantation soil. There was a highly significant positive correlation between soil inorganic nitrogen and organic carbon or soil moisture in the four forest types ($P<0.01$). Overall, vegetation type greatly affected the distribution of soil inorganic nitrogen. Our results can provide a reference for vegetation type selection and structural regulation of water conservation forests in the mountainous area of eastern Liaoning.

Key words: vegetation type; soil layer; NH_4^+-N; NO_3^--N.

*"十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAD38B0502)、"十二五"国家重大科技水专项(2012ZX07505-001)和辽宁石油化工大学科技创新人才引进团队计划项目资助。

**通讯作者 E-mail: zhiping_fan@hotmail.com

收稿日期: 2013-10-23 接受日期: 2014-02-25

水源涵养林植被类型、地形地貌特征对土壤氮循环过程有重要的作用,是影响流域水体无机氮素来源及富营养化的关键因子(闫加亮等, 2012)。不同植被类型土壤养分的分布规律和空间变异不同,对土壤中无机氮的积累、分布、循环有较大影响(戴全厚等, 2008),进而作用到流域集水区氮素的淋失与迁移过程,从而导致流域径流水质的变化。土壤有机氮经过微生物矿化作用,将其转化为铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)等土壤无机态氮(邓华平等, 2010),是供应植物直接吸收利用的主要氮素形态(黄昌勇, 1999)。土壤无机态氮的有效性受到土壤水分、温度、微生物组成等各种因素的影响(Galloway *et al.*, 2003),进而影响水源涵养林凋落物分解、有机质矿化速率以及生态系统的生产力(Magnani *et al.*, 2007)。目前,水源涵养林土壤结构特征、氮磷等养分的分布规律及其在流域空间的变异一直是研究的重点和热点(余新晓等, 2009; 刘兴诏等, 2010),目前对于水源涵养林集水区土壤无机氮素分布对流域水体质量的潜在影响研究仍需深化。小流域内植被类型与水质和水量调节功能之间的过程和机制十分复杂,研究水源涵养林植被对流域土壤氮素的影响是流域生态学领域的热点之一(Schoonover & Lockaby, 2006)。

辽宁东部山地是中国重要的水源涵养林分布区,是浑河和太子河的发源地,区域内分布的天然次生林和人工水源涵养林发挥着重要的水源涵养功能和土壤保持功能。研究该地区森林土壤的无机氮变化有助于解释水源涵养林生态系统氮循环过程、集水区及下游水域非点源氮素污染等问题。因此,本文通过研究辽东山区水源涵养林不同植被类型土壤无机氮的分布状况,分析无机氮含量与土壤其他理化指标的相关性,为进一步探讨流域氮素的潜在淋溶流失风险及运移特征提供参考,为水源涵养林生态系统的经营管理提供借鉴。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于辽宁抚顺老秃顶子国家级自然保护区,该区属于温带大陆性季风湿润气候,年均降水量870~1060 mm,海拔500~1367 m,土壤类型主要是暗棕色森林土和棕色森林土,年均气温6.3℃,其中2012年8月平均最高气温27.3 ℃、最低气温16.5 ℃,水源涵养林植被生物量较大,对土壤理化性质的影响较敏感。该区域水源涵养林植被类型主要包括人工林和天然次生林,形成了以落叶松(*Larix kaempferi*)为主、兼有红松(*Pinus koraiensis*)等树种的人工林,以及山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)、白桦(*Betula platyphylla*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等阔叶树种组成的天然次生林,林下灌木主要有毛榛子(*Corylus mandshurica*)、黄花忍冬(*Lonicera chrysantha*)、龙牙楤木(*Aralia mandshurica*)等,草本主要有大砧草(*Rubia chinensis*)、狭叶荨麻(*Urtica angustifolia*)、紫花地丁(*Viola philippica*)和细距堇菜(*Viola tenuicornis*)等。

1.2 样品采集

于2012年8月在鸿雁沟流域选取槭树-蒙古栎林、落叶松人工林、山杨林、白桦-山杨林等4种典型林分结构类型水源涵养林为研究对象,设置固定样地、每个样地设3个样方,在样方内以S型布点法设5个土壤采集样点(表1)。用100 cm^3环刀在0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 3个层次取原状土测容重,样地内所有采集点的3个分层土样混合均匀后分两份,一份按鲜样保存,带回实验室测定土壤含水量、NH_4^+-N含量、NO_3^--N含量;一份在室温下自然风干后过筛,用于土壤pH值、SOC、全氮等理化指标分析(表2)。

1.3 土壤样品分析

土壤容重用环刀法测定,土壤含水量用烘干法测定,土壤pH以2.5∶1的水土比搅拌混合均匀后静置30 min用pH计测定,土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定,土壤NH_4^+-N和NO_3^--N用2 mol·L^{-1} KCl振荡浸提后利用流动分析仪(Autoanalyzer III,

表1 研究样地植被结构特征与土壤类型
Table 1 Conditions of the tested forests

植被类型	代码	植被结构特征	海拔(m)	坡度(°)	土壤类型
槭树-蒙古栎林	A-Pd	主要优势种有色木槭、蒙古栎、花楷槭、毛榛子等	691	19~21	棕壤
落叶松人工林	Lg	主要伴生树种为黄菠萝和胡桃楸,但株数比例非常小	684	20~22	棕壤
山杨林	Pd	伴生树种主要有蒙古栎、黄桦、刺楸、千金榆等	636	22~24	棕壤
白桦-山杨林	Bp-Pd	色木槭和花楷槭种群密度最高,但胸径和树高都很小	604	12~15	棕壤

表 2 采样点土壤的基本理化性质

Table 2 Soil basic physical and chemical properties of sampled sites

植被类型	pH 值	容重 ($g \cdot cm^{-3}$)	含水量 (%)	有机质 ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮 ($g \cdot kg^{-1}$)	速效磷 ($mg \cdot kg^{-1}$)	全磷 ($g \cdot kg^{-1}$)
槭树-蒙古栎林	5.82±0.08	0.84±0.12	46.93±5.01	62.11±17.90	2.77±0.53	2.96±0.59	0.97±0.03
落叶松人工林	6.43±0.02	0.85±0.10	63.92±6.49	99.19±24.35	3.73±0.60	5.57±1.18	1.47±0.05
山杨林	5.97±0.07	1.01±0.05	40.11±2.59	52.70±10.02	2.13±0.18	4.87±0.14	0.65±0.02
白桦-山杨林	6.53±0.10	1.07±0.11	32.68±2.87	66.82±16.75	2.47±0.55	9.27±0.39	0.79±0.01

数据为 3 个土层的平均值±标准误。

Bran+Luebbe GmbH, Germany)测定,土壤速效磷用双酸浸提钼锑抗比色法测定(鲁如坤,2000),土壤全氮全磷用浓硫酸消煮后利用流动分析仪测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 对数据进行初步分析;采用 SPSS 16.0 进行方差齐性检验,并对土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量进行单因素方差分析;采用 LSD 法作多重比较分析(差异显著性水平为 $\alpha=0.05$);采用 Pearson 相关系数分析不同植被类型土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 与其他理化指标的相关性;采用 Origin 8.5 制图。

2 结果与分析

2.1 水源涵养林植被类型对土壤无机氮含量的影响

水源涵养林土壤无机氮的变化范围是 17.88 ~ 27.46 $mg \cdot kg^{-1}$(表 3),其中 NH_4^+-N 的变化范围是 10.49 ~ 20.99 $mg \cdot kg^{-1}$,NO_3^--N 的变化范围是 4.00 ~ 16.97 $mg \cdot kg^{-1}$,可以看出山杨林土壤的 NH_4^+-N含量最高、NO_3^--N 含量最低,落叶松人工林土壤的 NO_3^--N 含量最高、NH_4^+-N 含量最低。槭树-蒙古栎林、山杨林和白桦-山杨林等阔叶林 NH_4^+-N 的含量占到无机 N 的 79% 以上,表明阔叶林土壤中 NH_4^+-N 是土壤无机氮的主要存在形式。落叶松人工林NO_3^--N的含量占到无机N的61.8%,说明落叶松人工林土壤中 NO_3^--N 是土壤无机氮的主要存在形式。

表 3 不同植被类型土壤无机 N 含量

Table 3 Soil available nitrogen content in different vegetation types

植被类型	NH_4^+-N ($mg \cdot kg^{-1}$)	NO_3^--N ($mg \cdot kg^{-1}$)	无机氮 ($mg \cdot kg^{-1}$)
槭树-蒙古栎林	15.09±0.44	4.00±0.11	19.09±0.46
落叶松人工林	10.49±0.47	16.97±0.65	27.46±0.85
山杨林	20.99±0.37	0.77±0.07	21.76±0.36
白桦-山杨林	15.34±0.79	2.54±0.23	17.88±0.98

数据为 3 个土层的平均值±标准误。

2.2 不同土壤层次 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的变化

槭树-蒙古栎林、落叶松人工林、山杨林和白桦-山杨林等 4 种植被类型土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量的分布特征一致,均呈现由表层向下减少的趋势(图 1)。不同植被类型土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 在表层的含量最高。NH_4^+-N 含量除落叶松人工林、山杨林的 5 ~ 10 cm 与 10 ~ 20 cm 土层差异不显著外,其他植被类型各个层次相互之间均差异显著($P<0.05$);NO_3^--N含量除槭树-蒙古栎林、山杨林的

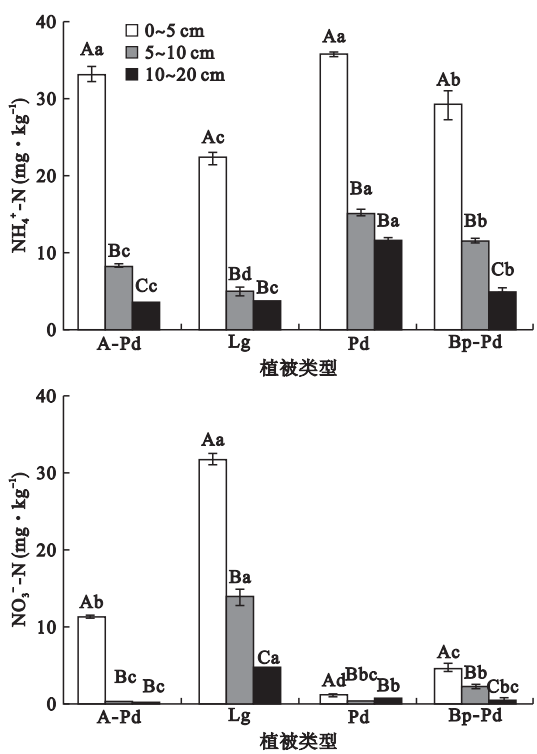


图 1 不同植被类型不同土层土壤铵态氮和硝态氮含量

Fig. 1 Soil NH_4^+-N and NO_3^--N concentrations of different soil layers in different vegetation types

A-Pd:槭树-蒙古栎林,Lg:落叶松人工林,Pd:山杨林,Bp-Pd:白桦-山杨林;不同大写字母表示同一植被类型不同土层间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同植被类型同一土层间差异显著($P<0.05$)。

表4 不同植被类型土壤无机氮含量与土壤理化性质相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients between soil available nitrogen content and physicochemical properties in different vegetation types

植被类型	氮形态	pH	容重	含水量	有机质
槭树-蒙古栎林	NH_4^+-N	0.968**	−0.877**	0.996**	0.985**
	NO_3^--N	0.969**	−0.853**	0.989**	0.970**
落叶松人工林	NH_4^+-N	0.123	−0.074	0.980**	0.982**
	NO_3^--N	0.256	−0.079	0.991**	0.988**
山杨林	NH_4^+-N	0.960**	−0.875**	0.980**	0.998**
	NO_3^--N	0.755*	−0.651*	0.885**	0.823**
白桦-山杨林	NH_4^+-N	0.612	−0.933**	0.998**	0.975**
	NO_3^--N	0.720	−0.880**	0.971**	0.961**

*相关显著($P<0.05$),**相关极显著($P<0.01$)。

5~10 cm与10~20 cm土层差异不显著外,其他植被类型各个层次相互之间均差异显著。

2.3 土壤pH、容重、含水量、有机质对土壤无机氮分布的影响

土壤pH、容重和含水量与土壤无机氮之间的相关分析(表4)表明,槭树-蒙古栎林土壤pH值与NH_4^+-N、NO_3^--N含量呈极显著正相关($P<0.01$),落叶松人工林、白桦-山杨林土壤pH值与NH_4^+-N、NO_3^--N含量均无显著关系,山杨林土壤pH值与NH_4^+-N、NO_3^--N含量呈极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)正相关。就土壤容重对土壤无机N分布的影响而言,槭树-蒙古栎林、白桦-山杨林土壤容重与NH_4^+-N、NO_3^--N含量均呈极显著负相关,而落叶松人工林土壤容重与NH_4^+-N、NO_3^--N含量均无显著关系,山杨林土壤容重分别与NH_4^+-N、NO_3^--N含量呈极显著和显著负相关;槭树-蒙古栎林、落叶松人工林、山杨林和白桦-山杨林等4种植被类型土壤含水量与NH_4^+-N、NO_3^--N含量均呈极显著正相关。土壤有机质与土壤无机氮之间的相关分析(表5)表明,槭树-蒙古栎林、落叶松人工林、山杨林、白桦-山杨林土壤有机质与NH_4^+-N、NO_3^--N含量均呈极显著($P<0.01$)正相关。

3 讨 论

土壤无机态氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)能反映土壤氮素供应情况(冯育青等, 2010),是土壤直接供给植物吸收的养分,其含量显著影响着森林土壤的生产力(赵维俊等, 2011)。在森林生态系统中,土壤无机氮主要以NH_4^+-N和NO_3^--N形式存在,是植物从土壤中吸收N的主要形式(陈伏生等, 2004)。

本研究中,4种植被类型0~5 cm土层土壤NH_4^+-N、NO_3^--N含量显著高于5~10 cm和10~20 cm土层。土壤表层(0~5 cm)山杨林样地土壤NH_4^+-N含量最高(35.93 mg·kg^{-1}),槭树-蒙古栎林(33.31 mg·kg^{-1})和白桦-山杨林(29.34 mg·kg^{-1})次之,落叶松人工林样地最低(22.50 mg·kg^{-1});对于土壤NO_3^--N而言,在0~5 cm土层内由高到低的顺序为落叶松人工林(31.85 mg·kg^{-1})>槭树-蒙古栎林(11.42 mg·kg^{-1})>白桦-山杨林(4.83 mg·kg^{-1})>山杨林(1.17 mg·kg^{-1})。Johnson等(2000)研究也表明,NH_4^+-N和NO_3^--N含量在土壤表层很高,表层以下急剧下降;方运霆等(2004)研究也认为,NH_4^+-N、NO_3^--N含量因植被类型和土层不同而异。

本文中不同植被类型对土壤NH_4^+-N、NO_3^--N含量的影响均差异显著,且不同植被类型对土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量影响不同。这与闫加亮等(2012)在大伙房实验林场对落叶松人工林、人工油松、天然阔叶次生林进行的研究结果相近,即不同植被对土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量影响均达到显著性差异。本研究表明,不同植被类型对土壤无机氮含量影响不同,可能是由于不同树种对土壤NH_4^+-N和NO_3^--N吸收利用速率不同。Schulz等(2011)对松树、橡树、山毛榉和柠檬树进行栽培实验,发现树种间土壤NH_4^+-N和NO_3^--N含量均达到显著性差异。也有研究发现,针叶树种主要利用NH_4^+-N而非NO_3^--N(Buchmann *et al.*, 1995)。

本研究表明,在4种植被类型中阔叶林土壤无机氮以NH_4^+-N占优势,山杨林NH_4^+-N含量在3个土壤层均为最高,而落叶松人工林土壤以NO_3^--N占优势(图1)。在土壤各种形态的氮素中,NO_3^--N的淋溶是氮素损失的重要途径(串丽敏等, 2010),NO_3^--N的淋溶损失风险随着土壤NO_3^--N含量的增加而升高(Meisinger *et al.*, 2002; Yao *et al.*, 2004)。由此可推断,阔叶林土壤NO_3^--N的潜在流失风险较小,而针叶林土壤NO_3^--N的潜在流失风险较大。在4种植被类型的土壤中,无机氮含量以落叶松人工林最高,达到了27.46 mg·kg^{-1}(表3)。由于落叶松人工林林下灌丛及草本层枯落物较为发达,不易发生地表径流和养分流失,土壤腐殖质层肥

沃、有机质含量高、容重小、pH 接近中性,土壤结构疏松、微生物活动较强,因此氮矿化、硝化作用较其他林地强。

pH 值是影响土壤氮循环的重要因素,土壤氮矿化作用、硝化作用等均需要在适宜土壤酸碱环境中进行(向升华等, 2008)。朱红霞等(2010)研究发现,土壤 pH 与 NO_3^--N 的空间分布格局极为相似,说明二者之间空间相关性较强。本研究中土壤 pH 值与土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量的相关性因植被类型的不同而有所差异。土壤容重、土壤湿度是影响微生物种类、微生物生物量和活性的重要因子(Evans *et al.*, 1998)。本研究中,除了落叶松人工林土壤容重与 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量无显著相关外,其他植被类型都呈显著或极显著负相关关系。李检舟等(2006)研究发现,土壤水分与氮的有效性均显著正相关,本文与其研究结果一致。

4 种植被类型土壤无机氮含量均与有机质呈极显著的正相关,植被类型土壤无机氮变化同有机质变化一致。土壤氮素含量与土壤有机质积累密切相关(王根绪等, 2002; 郭然等, 2004; 胡启武等, 2006)。李文宣(2008)研究发现,土壤速效氮的含量与有机质含量呈紧密的正相关,与本研究结果一致。本文无机氮和有机质之间的显著正相关关系进一步解释了土壤碳氮分布规律的相似性。土壤的氮素供应取决于土壤有机质的积累与分解状况。土壤有机质与地上植被类型及其根系凋落物输入及分解相关(Guo & Sims, 1999),可影响土壤容重和土壤毛管孔隙度等物理性状(Gray *et al.*, 2002)。

在辽宁东部山区,水源涵养林不同植被类型对土壤铵态氮、硝态氮和无机氮变化的影响显著不同,从而造成不同植被类型土壤在地表径流作用下非点源氮素淋失的风险不同。由于天然阔叶次生林土壤中硝态氮含量低,淋失风险小,可适当增加其在流域内的配置比例;落叶松人工林土壤中硝态氮含量高,淋失风险较大,可通过针阔树种混交模式进行其林分结构调控,从而达到单一树种结构的改善,降低氮素淋失风险。

致谢 感谢李胜男、郭文体在野外采样,艾桂艳在实验室样品分析过程中提供的帮助。

参考文献

陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 2004. 森林土壤氮素的转化与循环. 生态学杂志, **23**(5): 126–133.

串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 2010. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展. 中国农学通报, **26**(11): 200–205.

戴全厚, 刘国彬, 张 健, 等. 2008. 黄土丘陵区植被次生演替灌木种群的土壤养分效应. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, **36**(8): 125–131.

邓华平, 王光军, 耿 赟. 2010. 樟树人工林土壤氮矿化对改变凋落物输入的影响. 北京林业大学学报, **32**(3): 47–51.

方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 2004. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应. 生态学报, **24**(11): 2353–2359.

冯育青, 陈月琴, 阮宏华, 等. 2010. 苏州太湖湖滨带不同水分梯度土壤氮的时空变异特征. 华东森林经理, **24**(1): 7–14.

郭 然, 王效科, 刘 康, 等. 2004. 樟子松林下土壤有机碳和全氮储量研究. 土壤, **36**(2): 192–196.

胡启武, 欧阳华, 刘贤德. 2006. 祁连山北坡垂直带土壤碳氮分布特征. 山地学报, **24**(6): 654–661.

黄昌勇. 1999. 土壤学. 北京: 中国农业出版社.

刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 2010. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, **34**(1): 64–71.

李检舟, 沙丽清, 王 君, 等. 2006. 云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤氮矿化季节变化. 山地学报, **24**(2): 186–192.

李文宣. 2008. 森林土壤有机质与氮素供应研究. 林业勘察设计, (1): 107–110.

鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.

王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 2002. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响. 科学通报, **47**(23): 1771–1777.

向升华. 2008. 不同植被类型土壤有效氮研究 (硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.

闫加亮, 范志平, 孙学凯, 等. 2012. 小流域内植被类型对土壤 NO_3^-/NH_4^+ 空间变化的影响. 生态学杂志, **31**(8): 2044–2049.

余新晓, 张振明, 朱建刚. 2009. 八达岭森林土壤养分空间变异性研究. 土壤学报, **46**(5): 959–964.

赵维俊, 刘贤德, 车宗玺, 等. 2011. 祁连山东段青海云杉林土壤有效氮研究. 水土保持通报, **31**(4): 99–102.

朱红霞, 陈效民, 杜臻杰. 2010. 基于地统计学的土壤氮素与 pH 的空间变异性研究. 土壤通报, **41**(5): 1086–1090.

Buchmann N, Schulze ED, Gebauer G. 1995. ^{15}N-ammonium and ^{15}N-nitrate uptake of a 15-year-old *Picea abies* plantation. *Oecologia*, **102**: 361–370.

Evans CA, Miller EK, Friedland AJ. 1998. Nitrogen mineralization associated with birch and fir under different soil

moisture regimes. *Canadian Journal of Forest Research*, **28**: 1890-1898.

Galloway JN, Aber JD, Erisman JW, *et al*. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience*, **53**: 341-356.

Gray AN, Spies TA, Easter MJ. 2002. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **32**: 332-343.

Guo LB, Sims REH. 1999. Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **75**: 133-140.

Johnson CE, Driscoll CT, Siccama TG, *et al*. 2000. Element fluxes and landscape position in a northern hardwood forest watershed ecosystem. *Ecosystems*, **3**: 159-184.

Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, *et al*. 2007. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. *Nature*, **447**: 848-850.

Meisinger JJ, Delgado JA. 2002. Principles for managing nitrogen leaching. *Journal of Soil and Water Conservation*, **57**: 485-498.

Schoonover JE, Lockaby BG. 2006. Land cover impacts on stream nutrients and fecal coli form in the lower Piedmont of West Georgia. *Journal of Hydrology*, **331**: 371-382.

Schulz H, Härtling S, Stange CF. 2011. Species-specific differences in nitrogen uptake and utilization by six European tree species. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science*, **174**: 28-37.

Yao J, Hendershot WH, Whalen JK. 2004. Agricultural practices influence dissolved nutrients leaching through intact soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, **68**: 2058-2068.

作者简介 高洪翠,女,1988年生,硕士研究生,主要从事森林土壤养分循环研究。E-mail: gao.hongcui@163.com

责任编辑 张 敏